第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

# 天山典型冰川区径流年内变化分析

刘爽爽[1,2]， 李忠勤[1,3,4]， 张 慧[1]， 金 爽[1]， 邓海军[5]，
王璞玉[1]， 贾玉峰[3]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川观测试验站，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；4. 石河子大学，新疆 石河子 832000；5. 福建师范大学地理科学学院，福建 福州 350007）

**摘 要：**基于天山乌鲁木齐河源1号冰川区1980—2016年的水文和气象资料，对冰川区径流在月、日和时尺度的变化特征及其原因进行了分析。结果表明：（1）1980—2016年该区消融期（5—9月）径流总体呈上升趋势，倾向率为$3.44\times10^4\ m^3\cdot a^{-1}$，其中6—8月上升趋势较为显著；37 a来8月对径流增多贡献率最大，其次为6月和7月，5月和9月最低；消融期径流在1993年显著增加，5—8月径流均在20世纪90年代发生突变。（2）日径流量自1980s、1990s至2000s显著增加，而2010—2016年径流量有所减少；日径流峰值出现时间在1980s—1990s有明显提前趋势，但在2010—2016年，日径流峰值出现日期趋于稳定。（3）2011—2016年7月和8月昼夜流量变化较为显著；日流量曲线呈现"峰-谷"的日变化特征，且7月和8月峰值出现时间小于6月和9月。（4）1980—2016年，该流域消融期气温和降水均呈上升趋势；相关分析表明6—8月径流与气温均呈显著正相关。总体上冰川区年内径流与气温、降水在月、日尺度上表现出较好的同步性，表明其变化主要受控于同期的气温与降水量状况。

**关键词：**天山；乌鲁木齐河源1号冰川；年内径流变化；气候变化



冰川作为"固体水库"是干旱地区河流补给和农业灌溉的重要来源[1]，天山被誉为"中亚水塔"[2]，山区广泛分布的冰川成为中亚干旱区水资源的重要组成部分。1961—2012年，受气候变暖影响，天山冰川面积退缩约18%，物质损失约27%[3]，河川年径流量增加的同时[4]，径流年内变化也发生改变，以冰川融水补给为主的河流在6—9月径流明显增大，冰川消融使得洪水发生风险上升[5-6]，季节性供水矛盾加剧[7]，直接影响中亚干旱区农业生产灌溉和社会经济的可持续发展[8-9]。因而，准确揭示冰川消融背景下冰川区年内径流变化规律，对于天山冰川水资源的合理调配及冰雪灾害的监测预防具有重要的科学和现实意义。

当前气候变暖形势下，天山山脉多数河川径流量季节性增加显著。北天山冰川覆盖度达10%以上的流域，秋冬季径流量上升趋势明显[10]；中天山阿克苏河流域主要支流台兰河汛期径流明显增多[11]，另一支流库玛拉克河自21世纪以来，冬季、春季和夏季的径流量分别增加13%、15%和15%[4]。冰川区径流的年内变化也涵盖其日变化特征，位于天山汗腾格里-托木尔峰地区的科其喀尔冰川单日最大径流量出现在18:00以后，最小流量出现在7:00—10:00，最大流量滞后最高气温约4:00—10:00[12]。冰川融水作为天山山区河川径流的重要补给源，其径流年内变化将会影响下游城市水资源供需稳定，而高分辨率和长时间序列观测资料是准确揭示冰川区径流年内变化的关键所在，但受控于冰川区恶劣环境制约，长期以来系统性的冰川区径流年内变化研究仍相对有限。

天山乌鲁木齐河源1号冰川（以下简称"乌源1

**收稿日期：**2020-05-22； **修订日期：**2020-07-28
**基金项目：**第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0201）；中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20020102）；国家自然科学基金项目（41771077）资助
**作者简介：**刘爽爽（1995-），女，在读硕士研究生，从事冰川水文研究. E-mail: liushuangshuang18@mails.ucas.ac.cn
**通讯作者：**李忠勤. E-mail：lizq@lzb.ac.cn

号冰川”)是天山山脉中少有的观测时间最长、资料最为系统的全球重点监测冰川，亦是中亚干旱区代表性的定位参照冰川，自1964年以来，乌源1号冰川面积已退缩22%[13]，作为乌鲁木齐河的发源地，冰川区径流的年内变化将对乌鲁木齐工农业生产和城市生活带来重要影响[14]。杨针娘[15]基于1959—1987年径流观测，指出乌源1号冰川区流量过程线变化受气温和降水综合作用；Ye等[16]通过回归分析建立1959—2003年气温与冰川物质平衡的关系，发现气温尤其是夏季气温是影响径流变化的主控因素；韩添丁等[17]剖析了2003年7月一次大型降水事件得到气温与径流变化关系密切；李忠勤等[18]、Li等[19]指出1959—2006年冰川径流明显增加，特别是1995年以后冰川加速消融，亦受气温和降水的影响；孙美平等[20]、Gao等[21]基于系统性气象、水文观测资料，发现降水虽可缩短时滞，但气温仍是关键因素。由于长序列冰川水文系统观测资料的缺乏，以往研究多侧重于冰川区径流的年际变化，针对径流年内(月、日和时尺度)变化特征尚缺乏系统分析。本研究基于中国科学院天山冰川观测试验站多年水文、气象资料，对1980—2016年乌源1号冰川区年内径流分配及变化特征进行分析，以期深入研究气候变暖背景下，冰川加速消融引起的水文水资源效应，从而为乌鲁木齐乃至中亚水资源评估和利用提供科学参考。

## 1 研究区概况、数据及方法

### 1.1 研究区概况

乌鲁木齐河源1号冰川区(43°07′33.98″ ~ 43°07′34.155″N，86°48′35.456″ ~ 86°48′20.896″E)地处中亚内陆东天山段中部的天格尔Ⅱ峰北麓，为乌鲁木齐河的发源地。该区的水文观测始于20世纪50年代，距乌源1号冰川末端300 m处河道布设有水文断面(3693 m)，用于监测乌源1号冰川融水径流。断面控制面积3.34 $km^2$，由乌源1号冰川、冰碛物和裸露山岩组成。断面观测资料显示，多年平均径流约为$1.95\times10^6 m^3$，径流年内分配不均匀，5—9月均有径流产生，其中，6—8月径流约占全年径流量的88%，最盛的7月占总径流的43%。乌源1号冰川为双冰斗-山谷冰川，受冰川退缩的影响，1993年分裂为东西两支，2017年总面积为1.54 $km^2$[13]，海拔3810 ~ 4486 m。该区大陆性气候显著，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥。据大西沟气象站(43°06′N，86°50′E，3539 m)的观测资料显示，多年平均降水量480 mm，86%集中于5—9月，年均温为-4.7 ℃。1959年起，天山冰川观测试验站已于该区建立了完善的水文-气象观测体系(图1)。

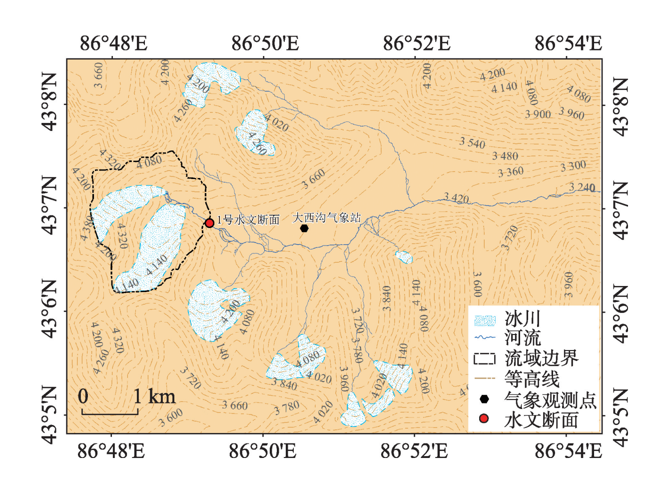



图1 乌鲁木齐河源区冰川、水文和气象站的位置

Fig. 1 Map of the Urumqi River source region showing the locations of glaciers, hydrological and meteorological stations

### 1.2 数据来源

乌源1号冰川水文观测依托天山冰川站，始于1959年，依据国家水利行业标准SL 58-2014《水文测量规范》和国标GB/T 50138-2010《水位观测标准》，使用CS456型渗压式水位传感器每10 min记录1次水位，观测时段为每年5—9月的冰川消融期；利用CS10型旋桨流速仪和多普勒流速仪进行流速观测，并根据所测水位、流速等数据计算流量，得出水位-流量关系曲线。1966—1979年受历史原因影响，观测暂停，1980年恢复水文观测，因此，1966—1979年年径流数据是经前人模型重建所得，由于本研究重点突出径流年内变化的实际观测，为保证实测数据的连续性，将1980年作为起点展开研究，因此，采用乌源1号冰川水文断面1980—2016年消融期(5—9月)逐日流量数据，同期气象数据来自大西沟气象站。为进行更细尺度研究，2011—2016年逐时气象数据采自冰川末端附近监测塔(图1)。

### 1.3 研究方法

采用线性倾向和Mann-Kendall趋势检验法判

定1980—2016年研究区消融期(5—9月)及其各月的流量变化趋势,前者通过对径流序列做线性回归,判断37 a来消融期和各月的升降趋势,后者进一步检验这种变化趋势的显著性。在Mann-Kendall趋势检验中,原假设$H_0$表示数据集$X$的数据样本独立同分布,没有趋势存在。可选假设$H_1$表示数据集$X$中存在一个单调的趋势。统计检验量$S$如下:

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}\left(x_j-x_i\right) \tag{1}$$

式中:$x_i$时间序列为$i$=1, 2, 3, …, $n$−1;$x_j$为另一时间序列$j=i$+1, …, $n$,其中$n$为数据集合长度。当$x_j-x_i$大于、等于和小于0时,sgn($x_j-x_i$)相应地分别等于1、0和−1。

对于长时间序列,检验统计量$S$可转化为$Z_c$,其公式如下:

$$Z_c=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S>0\\ 0, & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S<0\end{cases} \tag{2}$$

当$-1.96\leqslant Z_c\leqslant 1.96$时,接受原假设$H_0$,说明无明显趋势。若$|Z_c|>1.96$,则在95%置信水平趋势显著;若$|Z_c|>2.58$,则在99%置信水平趋势显著。$Z_c$为正表示序列呈上升趋势,$Z_c$为负表示序列呈下降趋势。

选用Mann-Kendall突变检验法综合诊断该区径流序列消融期突变,比较得出消融期径流突变年份为1993年。Mann-Kendall突变检验是确定水文序列中突变时间点的有效方法,假设时间序列$x$具有$n$个样本量,构造一个秩序列$S_k$:

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}r_i \quad (k=2, 3, 4, \cdots, n) \tag{3}$$

$$r_i=\begin{cases}+1, & x_i>x_j\\ 0, & x_i\leqslant x_j\end{cases} \quad (j=1, 2, 3, \cdots, i) \tag{4}$$

通过将$S_k$进行标准化生成$UF_k$统计量:

$$UF_k=\frac{S_k-E(S_k)}{\sqrt{\mathrm{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, 3, \cdots, n) \tag{5}$$

其中$UF_1=0$;$E(S_k)$与var($S_k$)是累计数$S_k$的均值和方差。另将其反序列进行标准化生成$UB_k$曲线,若$UF_k$和$UB_k$两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

## 2 结果分析

### 2.1 径流月尺度变化

1980—2016年,乌源1号冰川区消融期(5—9月)径流总体呈上升趋势,倾向率为$3.44\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot a^{-1}}$,其中各月上升态势存在差异(图2)。8月径流上升速率最高,达$1.52\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot a^{-1}}$;其次为6月和7月,上升速率均为$0.98\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot a^{-1}}$;5月和9月径流变化较为平稳,增幅较小,增加速率仅为$0.02\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot a^{-1}}$和$0.21\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot a^{-1}}$。据各月径流倾向率可知,8月径流对冰川区总径流增多的贡献率最大(44%),其次为6月和7月(29%),9月和5月仅分别为6%和0.6%。Mann-Kendall趋势检验表明,6月和8月径流增加通过了0.01的显著性检验;7月通过了0.05的显著性水平检验;而5月和9月径流无显著趋势(表1)。

**表1 1980—2016年乌源1号冰川区消融期及各月径流的Mann-Kendall检验**

**Tab. 1 Mann-Kendall detection of detection of average runoff in the ablation period and monthly runoff of the Urumqi Glacier No.1 from 1980 to 2016**

| 时间 | 检验统计量 | Kendall斜率 | 趋势性 | 显著性 |
|---|---|---|---|---|
| 消融期 | 3.06** | 3.4 | 上升 | 显著 |
| 5月 | −0.75 | 0.0 | 无 | 无 |
| 6月 | 3.15** | 1.0 | 上升 | 显著 |
| 7月 | 2.18* | 0.9 | 上升 | 显著 |
| 8月 | 3.13** | 1.5 | 上升 | 显著 |
| 9月 | 0.22 | 0.0 | 无 | 无 |

注:*、**分别表示在5%和1%的水平显著。下同。

差积曲线显示,乌源1号冰川区消融期径流在1993年显著升高(图2),1993—2016年径流量比1980—1992年增加近56%,并且自1993年以来一直处于高位波动,并略有下降趋势。其中,5—7月径流在1993年左右升高明显,1993年后分别增加了75%、87%和32%;8月也在1997年后增加了64%。月径流的Mann-Kendall突变检验显示,除9月外,5—8月径流均在20世纪90年代发生突变,6月和7月径流突变年一致(1992年),5月和8月径流发生突变时间较晚,分别为1994年和1996年,与差积曲线分析结果基本一致。

### 2.2 径流日尺度变化

1980—2016年冰川区的日径流数据显示,乌源

1号冰川区多年平均日径流自5月1日产流开始，至7月28日左右达到峰值，之后开始递减，至9月30日基本结束，整个过程持续约153 d。其中，53%的流量集中时段为7月10日至8月14日，37 a日平均径流为$1.74\times10^4$ $m^3$。为深入探究径流日变化规律，基于年际尺度细致分析了日径流过程线形状和大小的演变趋势。研究发现，该区从1980s、1990s至2000s，日径流显著增加，2010—2016年径流量有所减少，但总体表现为上升趋势（图3）。据统计，1980s至1990s日平均径流增加24%，主要增幅在

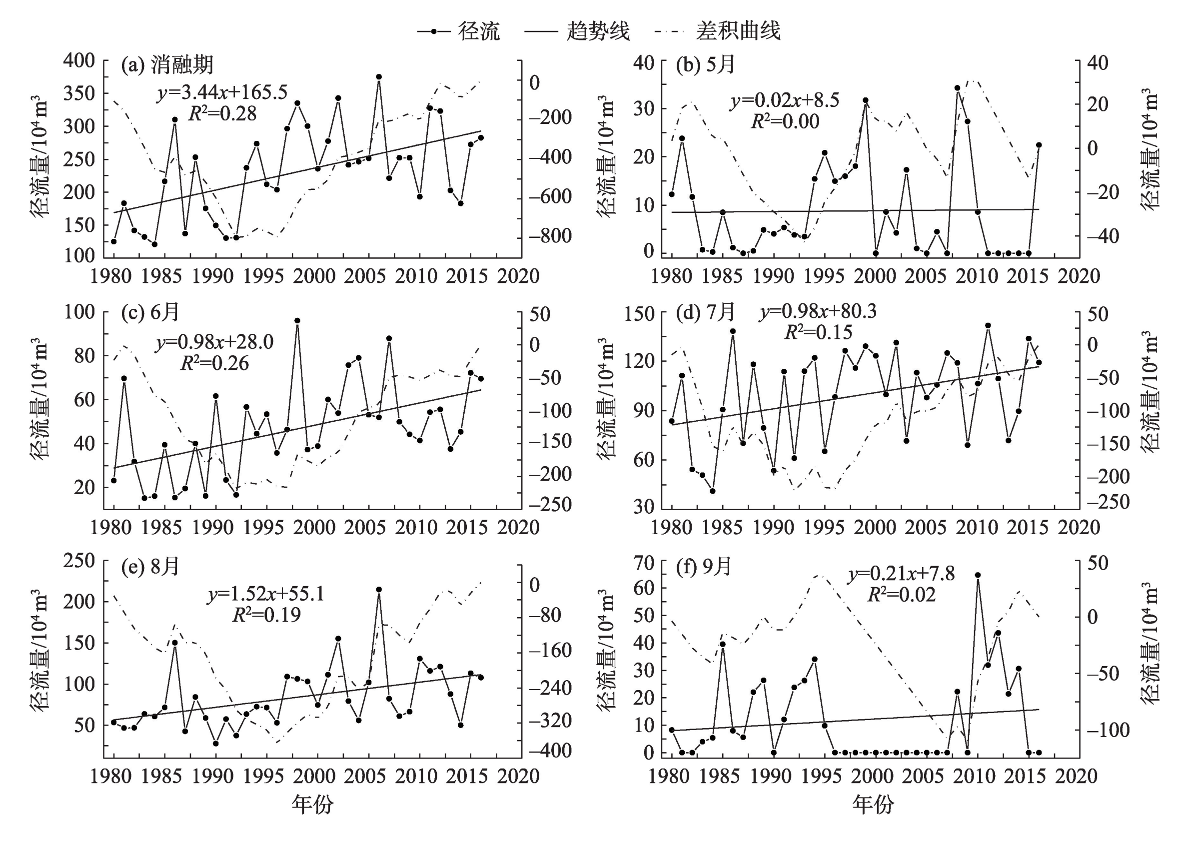



图2 1980—2016年乌源1号冰川区消融期径流及差积曲线变化

Fig. 2 Variation of runoff and accumulated difference curve of the Urumqi Glacier No.1 during ablation period from 1980 to 2016

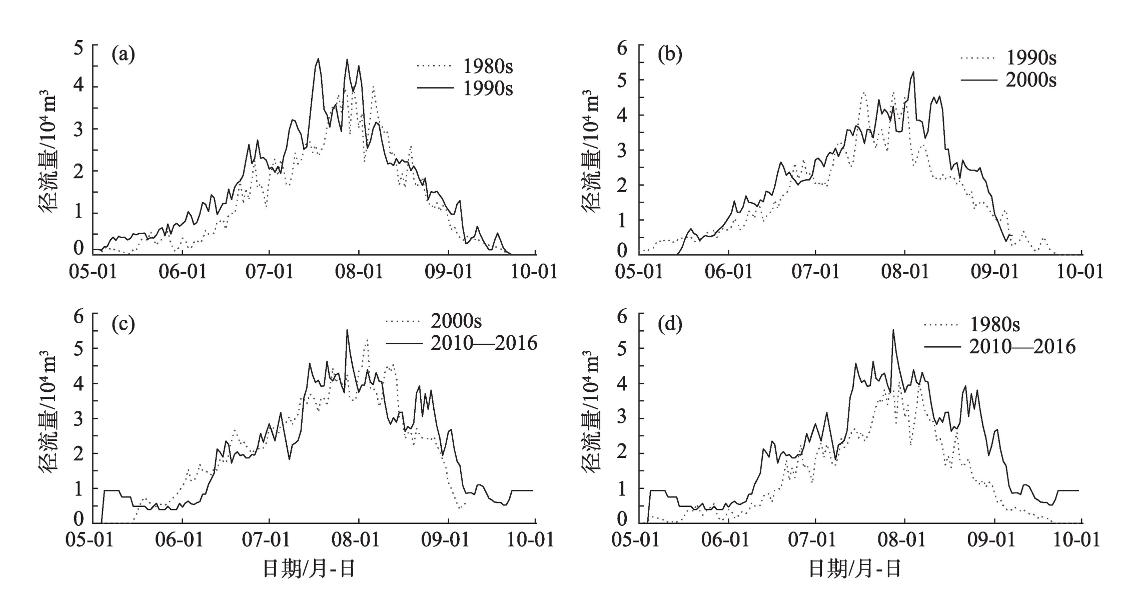



图3 乌源1号冰川区1980s、1990s、2000s和2010—2016年日平均径流

Fig. 3 Mean daily runoff from Urumqi Glacier No.1 during the 1980s, 1990s, 2000s and 2010–2016

5—7月(34%)(图3a);2000s日径流持续增加,且保持较高增加幅度(34%),8月偏多,增幅达43%(图3b);到2010—2016年,日平均径流较2000s减少4%(图3c),但相比于1980s,径流过程线整体变宽变高,较1980s增加60%(图3d)。

随着气候变暖,各年代日径流峰值时间发生变化。1980s该区日径流峰值出现在7月30日,而在1990s其日径流峰值明显提前,出现在7月18日。通过分析大西沟气象站的历史气象数据,认为1990s 6—7月降水的异常增加是径流峰值出现提前的主要原因。随后在2000s和2010—2016年,日径流峰值出现时间相差较小,分别为8月4日和7月28日,与年代际间日气温和降水增幅较小有关。总体表现为该区日径流峰值出现时间在1990s具有提前态势(约提前了12 d),但在2000—2016年,日径流峰值的出现时间较稳定(7月28日左右)。此外,受气温和降水的共同作用,各年代日径流曲线波动明显,峰谷交替出现,表现为7月和8月日径流波动最大,尤以2010—2016年最为显著,峰谷数量较多,此阶段气温和降水有较大波动;5月、6月和9月波动性较小,与同期气温和降水较低有关。

## 2.3 径流时尺度变化

图4为乌源1号冰川区2011—2016年消融期实测的昼平均流量(9:00—20:00)、夜平均流量(21:00至次日8:00)与日流量变化。结果显示,消融期各月昼平均流量均大于夜平均流量(图4a)。其中,7月和8月昼夜流量变化幅度最大,昼夜平均流量比率分别达1.573和1.673,其次为6月和9月,比率分别为1.147和1.505,5月变化幅度最小,昼夜平均比率仅为1.004。该区亦具有显著的日变化过程,流量曲线呈现"峰—谷"的日变化特征,最大流量出现在15:00—18:00,最小流量出现在8:00—9:00(图4b)。此外,按照最小流量出现到最大流量出现的时间间隔来看,7月和8月所需时间最短,为7 h,其次为6月和9月,均为8 h。

## 2.4 流域气候变化

1980—2016年该流域消融期增温显著,升温速率达0.5 ℃·$(10a)^{-1}$($P < 0.01$)(图5a)。5月气温变化比较平稳,增温速率仅为0.2 ℃·$(10a)^{-1}$,6—9月气温变化均表现出上升趋势,上升幅度大体相同,倾向率达0.5 ℃·$(10a)^{-1}$。Mann-Kendall突变性检验结果表明,在0.01显著性检验水平之下,6—9月气温突变点均出现于20世纪90年代,之后增温趋势更为显著。同时段内该流域降水量也呈现出增长的趋势[27 mm·$(10a)^{-1}$,$P < 0.01$](图5c),多年平均降水量达到414 mm。5—9月降水中仅有5月增加幅度最明显[7.5 mm·$(10a)^{-1}$],9月降水呈微弱减少趋势[−0.9 mm·$(10a)^{-1}$]。降水突变年份发生在1993年左右。从日尺度的气温和降水分布(图5b和图5d)可以看出,2010—2016年气温较1980s明显偏高,特别是6月2日后,气温增加十分明显,2010—2016年消融期平均气温比1980s高出50%;降水也显著增多,2010—2016年平均降水量为509 mm,比1980s高出23%。总体而言,20世纪90年代以来,该流域消融期气温和降水增幅最为显著,但相比于80

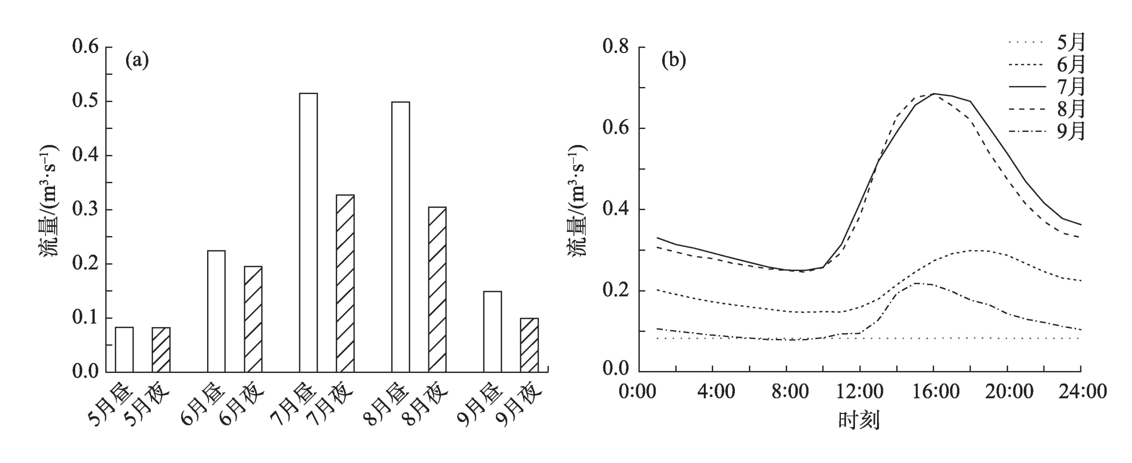



图4 2011—2016年乌源1号冰川区不同月份昼夜平均流量对比以及日流量变化

Fig. 4 The comparison of daytime and nighttime discharges and the daily cycle of mean discharge in different months from 2011-2016

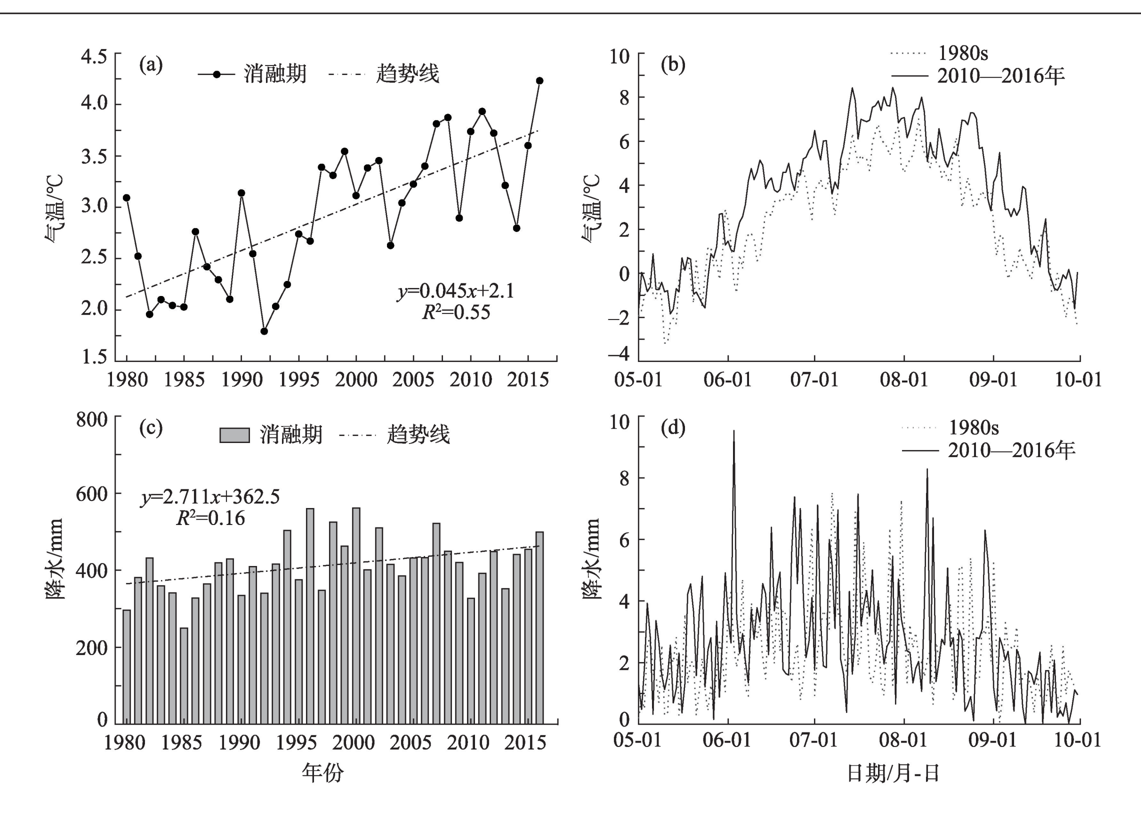



图5　1980—2016年乌源1号冰川区消融期气温和降水分布

Fig. 5　Variation in air temperature and precipitation during ablation period of the 1980–2016



年代，气温的增幅远高于降水。

## 3　讨论与结论

### 3.1　讨论

冰川区径流包括冰川积累区的积雪与粒雪融水径流、冰川消融区径流以及裸露山坡径流[15]。冰川变化的驱动因素主要是冰川区气候条件[22-23]，因此，雪冰消融不仅取决于气温的高低，还与降水量的增减密切相关。

相关分析表明：月尺度上，6—8月径流与气温均呈显著正相关，相关系数在0.67以上，而与降水未表现出显著相关（表2）；5月气温上升趋势不明显，降水虽然增多，未带来显著产流；而9月气温上升幅度大，降水变化小，9月径流却有所增加，表明冰川区径流受气温变化更为显著，而降水影响相对较小。受气候变暖影响，径流也于6月2日前后呈现出显著的上升趋势，与日气温的年代际变化曲线大体一致。时尺度上，流量与气温呈显著正相关（$R^2=0.53$，$P<0.01$），当气温大于5 ℃时，流量呈加速增长[18]。总体上径流、气温与降水的变化在月、日和时尺度上保持较好的同步性，径流短期内的增减，主要取决于冰川区气温与降水量的组合。

**表2　1980—2017年乌源1号冰川区各月径流与气温、降水的相关系数分析**

**Tab. 2　Correlation coefficients of runoff versus monthly temperature and monthly precipitation**

| | 气温 | *P*值 | 降水 | *P*值 |
|---|---|---|---|---|
| 5月 | 0.23 | 0.17 | −0.13 | 0.13 |
| 6月 | 0.72** | 0.00 | 0.02 | 0.91 |
| 7月 | 0.74** | 0.00 | 0.14 | 0.41 |
| 8月 | 0.67** | 0.00 | 0.07 | 0.67 |
| 9月 | 0.06 | 0.74 | 0.02 | 0.91 |
| 消融期 | 0.59** | 0.00 | 0.41* | 0.01 |

### 3.2　结论

通过对1980—2016年乌源1号冰川区径流月尺度、日尺度和时尺度径流变化特征及其同期气温和降水的对应关系进行分析，得出以下结论：

（1）1980—2016年，乌源1号冰川区消融期径流总体呈上升趋势，倾向率为$3.44\times10^4\ m^3\cdot a^{-1}$，各月上升态势存在差异，其中6—8月上升趋势显著；37 a间8月对径流增多的贡献率最大（44%），其次为7月和6月（29%），9月（6%）和5月（0.6%）最低；消融期径流在1993年显著升高，6月和7月径流在1993年后分别增加87%和32%；8月也在显著变化年（1997年）后增加64%。日径流主要集中于5—9月，从年

代际时间尺度看,从1980s、1990s至2000s,日径流显著增加,但2010—2016年径流量较2000s减少4%;各年代日径流峰值出现时间总体表现为:1990s的出现时间具有明显的提前趋势,1990s出现时间不再提前,至2000—2016年出现日期趋于稳定。时尺度上,2011—2016年,消融期各月昼平均流量均大于夜平均流量,且7月与8月昼夜流量变化幅度整体高于5月、6月与9月;日变化特征明显,峰值主要集中于15:00—18:00,谷值时段为8:00—9:00,7月和8月峰值到来时间(7 h)小于6月和9月(8 h)。

(2)径流、气温与降水的变化在月、日尺度上保持较好的同步性,径流短期内的增减,主要取决于冰川区气温与降水量的组合。同期该流域消融期气温与降水总体均呈上升趋势;月尺度上,6—8月径流与气温均呈显著正相关,而与降水未表现出显著相关。日尺度径流与日气温的年代际变化曲线大体一致。



## 参考文献(Reference):


[1] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(2): 135-140.

[2] Chen Y N, Li W, Deng H J, et al. Corrigendum: Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 39364-39364.

[3] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(9): 716-722.

[4] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26. ]

[5] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513-527. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513-527. ]

[6] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355-1370. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The response of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355-1370. ]

[7] 施雅风, 白重瑗. 冰雪资源的利用[J]. 冰川冻土, 1983, 5(1): 85-87. [Shi Yafeng, Bai Chongyuan. Some idea on utilization of snow and ice resources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(1): 85-88. ]

[8] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于SPEI指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 331-340. [Zhang Leyuan, Wang Yi, Chen Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based on SPEI index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 331-340. ]

[9] 姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 269-276. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Progress of study on variation of atmospheric water cycle factors over arid region in Northwest China [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 269-276. ]

[10] Shahgedanova M, Afzal M, Severskiy I, et al. Changes in the mountain river discharge in the northern Tien Shan since the mid-20th Century: Results from the analysis of a homogeneous daily streamflow data set from seven catchments[J]. Journal of Hydrology, 2018: 1133-1152.

[11] Kriegel D, Mayer C, Hagg W, et al. Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia[J]. Global Planet Change, 2013, 110: 51-61.

[12] Han H D, Liu S Y, Wang J, et al. Glacial runoff characteristics of the Koxkar Glacier, Tuomuer-Khan Tengri Mountain Ranges, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61: 665-674.

[13] Xu C H, Li Z Q, Li H L, et al. Long-range terrestrial laser scanning measurements of annual and intra-annual mass balances for Urumqi Glacier No. 1, eastern Tien Shan, China[J]. The Cryosphere, 2019, 13: 2361-2383.

[14] 李新琪, 海热提·涂尔逊. 乌鲁木齐市水资源开发利用现状、问题及对策[J]. 干旱区研究, 2001, 18(2): 11-18. [Li Xinqi, Tursun Haireti. A study on the present situation, problems and countermeasures of sustainable exploiture and utilization of water resources in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(2): 11-18. ]

[15] 杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 74-78. [Yang Zhenniang. Glacier Water Resources in China [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 74-78. ]

[16] Ye B S, Yang D Q, Jiao K Q, et al. The Urumqi River source Glacier No. 1, Tianshan, China: Changes over the past 45 years[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L21504.

[17] 韩添丁, 高明杰, 叶柏生, 等. 乌鲁木齐河源冰雪及多年冻土径流过程特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 573-579. [Han Tianding, Gao Mingjie, Ye Baisheng, et al. Characteristic of runoff process of the glacier and permafrost in the headwaters of the Urumqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 573-579. ]

[18] 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40 a观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123. [Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at head-

water of Urumqi River, Tianshan, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117–123. ]

[19] Li Z Q, Wang W B, Zhang M J, et al. Observed changes in streamflow at the headwaters of the Urumqi River, eastern Tianshan, Central Asia[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 217–224.

[20] 孙美平, 姚晓军, 李忠勤, 等. 天山东段冰雪消融与产汇流水文过程——以乌鲁木齐河源区为例[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 945–957. [Sun Meiping, Yao Xiaojun, Li Zhongqin, et al. Hydrological process of glacier and snow melting and runoff in Urumqi River source region, eastern Tianshan Mountains, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 945–957. ]

[21] Gao M J, Han T D, Ye B S, et al. Characteristics of melt water discharge in the Glacier No. 1 basin, headwater of Urumqi River[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489: 180–188.

[22] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295–1304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yiting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295–1304. ]

[23] 李开明, 陈世峰, 康玲芬, 等. 中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析——以天山乌鲁木齐河源1号冰川和玉龙雪山白水河1号冰川为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 12–19. [Li Kaiming, Chen Shifeng, Kang Lingfen, et al. Variation of continental glacier and temperate glacier in China: A case study of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 12–19. ]



# Temporal inner–annual runoff variation in the variation in the typical glacier region of the eastern Tianshan Mountains, China

LIU Shuang-shuang[1,2], LI Zhong-qin[1,3,4], ZHANG Hui[1],
JIN Shuang[1], DENG Hai-jun[5], WANG Pu-yu[1], JIA Yu-feng[3]

(1. *State Key Laboratory of Cryospheric Science/Tianshan Glaciological Station*, *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*; 2. *University of the Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; 3. *College of Geography and Environment Science*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*; 4. *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *Xinjiang*, *China*; 5. *School of Geographical Sciences*, *Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *Fujian*, *China*)

**Abstract:** The purpose of this study was to explore the response of inner–annual runoff to climate change in the typical glacier region of the eastern Tianshan Mountains, China. We analyzed the characteristics of runoff at monthly, daily, and hourly scales using hydrological and meteorological data from 1980 to 2016. The results showed that runoff increased ($3.44 \times 10^4$ $m^3 \cdot a^{-1}$) during ablation periods, especially from June to August; August contributed the most to the runoff increase, followed by June and July, while May and September contributed the least to the runoff increase. The runoff during the ablation period increased significantly in 1993, and the runoff from May to August changed suddenly in the 1990s. Though the daily runoff increased during the 1980s, 1990s, and 2000s, the runoff decreased from 2010 to 2016. The diurnal flow changed significantly in July and August from 2011 to 2016; the daily flow curve showed a "peak–valley" daily variation, with a shorter peak time in July and August than June and September. Air temperature and precipitation followed upward trends during the ablation periods from 1980 to 2016; correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between runoff and air temperature from June to August. On the whole, the runoff, air temperature, and precipitation kept good synchronization on monthly and daily scales. Air temperature and precipitation in the glacierized areas contributed most to the increase and decrease of runoff in a short time.

**Keywords:** Tianshan Mountains; Urumqi Glacier No. 1; inner–annual runoff variation; climate change